

온도를 고려한 FFKM O-링의 밀봉력에 관한 연구

김청균[†] · 조승현

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

On the Sealing Force of Perfluoroelastomer O-rings Including Temperature Effects

Chung Kyun Kim[†] and Seung Hyun Cho

Tribology Research Center, Hongik University

Abstract – O-ring seal is widely used for sealing pressure vessels and oil containers in various applications of mechanical equipments. The doughnut shape of the O-ring is very important components in most of the system assembly of mechanical apparatus. This paper presents the sealing force of a pressurized perfluoroelastomer O-ring, which is very important contact seal in sealing the semiconductor equipment. The sealing pressure is measured by experimental method and analyzed numerically by using the non-linear MARC finite element program. The seal tester is made to measure the contact force and displacement of the O-ring with an automatic control system of the working temperature. The results show the reasonable agreements between the computed FEM results and measured ones when the operating temperature is moderate temperature. But the compared values between the computed and tested results show a difference because of the increased temperature, which is related to the non-linear parameter of the O-ring material.

Key words – o-ring, perfluoroelastomer, contact stress, sealing force, FEM.

1. 서 론

FFKM(Perfluoroelastomer)으로 제조된 O-링은 펌프, 압축기, 액츄에이터 등에 보조 시일로 장착되어 동력 손실을 줄여주고, 오일이나 가스의 누설을 방지하는 등 중요한 기능을 한다. PTFE 소재와 유사한 구조를 갖고 있는 PTFE O-링 시일을 사용하는 가장 큰 이유는 아세톤, 벤젠, 메탄올 등과 같은 어떠한 종류의 작동 매체에 적용이 가능하다는 장점이다. 즉, FFKM 소재는 높은 내화학성, 내플라즈마성, 내열성 등을 갖고 있다. 여기에 FFKM으로 제작한 O-링은 체적 팽창율이 다른 소재로 제조한 O-링에 비하여 대단히 작고, 안정적이라는 사실이 큰 장점이다[1].

기계평면시일에서 2차 시일로 사용되는 대부분의 O-링은 작동 매체에 의한 체적 팽창을 때문에 접촉 운동

부에서 마찰이 과도하게 발생하면 시일링과 시일시트 사이의 밀봉 간극이 증가되어 불필요한 누설이 발생하기도 한다. 이와 같이 O-링이 누설을 차단하기 위해서는 정적 또는 동적 상태에서 단면의 형상변화가 작아야 하기 때문에 O-링은 팽창에 대한 저항이 커야하고, 낮은 압축률과 높은 표면조도를 가져야 안정적이다.

O-링 시일의 단면변화를 일으키는 인자로 유체와의 화학적 반응정도, 유체압력, 온도 등이 있는데, 특히 온도에 대한 영향은 매우 중요하다. 왜냐하면 탄성체 O-링 시일은 온도의 증가에 의해 팽창하면서 강도는 저하되기 때문이다.

기존의 O-링 시일에 대한 연구는 일반적으로 널리 사용되는 탄성체 폴리머인 NBR이나 PTFE를 대상으로 활발하게 진행되고 있으나, FFKM에 대한 연구는 아직도 활발하게 진행되지 못하고 있다[2-5]. 특히 국내에서 FFKM에 대한 연구는 대단히 취약하고, 이중 O-링의 내부소재로 사용하여 최적화 설계를 수행한 경

[†]주저자 · 책임저자 : cckim@wow.hongik.ac.kr

우가 유일하다[6].

본 논문에서는 FFKM으로 제작한 O-링의 온도거동 특성을 알아보기 위해 FFKM 표준시편으로 인장시험을 통해 확보한 응력-변형을 특성곡선을 유한요소해석에 적용하였다[7]. 또한, O-링의 밀봉력에 대한 유한요소해석의 한계점을 극복하기 위해서 온도특성을 파악할 수 있는 실험장치를 고안하여 O-링의 밀봉력을 측정할 수 있는 실험을 수행하여 FFKM O-링의 온도에 따른 접촉력을 고찰하였다.

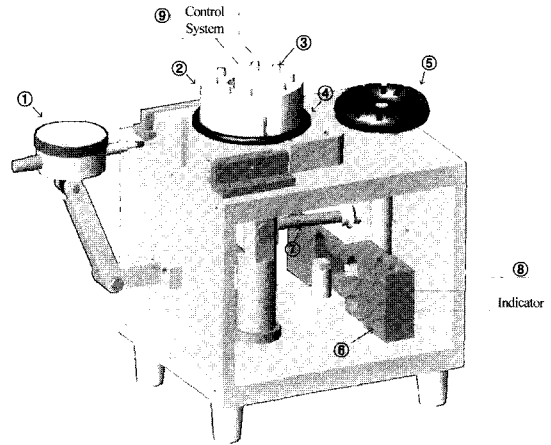
2. 본 론

2-1. 실험장치 및 방법

중심축과 O-링 사이에 존재하는 접촉력을 실험하기 위해 실린더가 반경방향으로 일정 거리만큼 자유롭게 이동할 수 있도록 실린더를 분할형으로 제작하고, 실린더의 한쪽을 정밀하게 이동시키면서 반경방향으로 걸리는 하중을 측정한다. 이 때에 다이얼게이지의 스프링 힘과 연결봉의 초기하중을 보상하기 위해 인디케이터와 다이얼게이지를 우선 0점으로 보정한다.

폴리머 탄성체의 특성상 시간에 따른 하중변화가 안정적으로 충분히 나타나도록 24시간 동안 하중에 따른 특성을 관찰한다. O-링의 접촉력에 대한 온도효과를 알아보기 위해 전기히터의 온도 컨트롤 시스템의 자동 미세조정 기능을 사용하여 O-링에 공급되는 온도를 정밀하게 제어한다. 전기히터의 온도는 보통 가열초기에 급격하게 상승하지만, 시간이 경과할수록 O-링에서 발생하는 하중의 변화가 완만하다는 점을 고려하여 시간과 온도조건을 조절하였다. 특히 온도에 따른 접촉력의 변형거동을 관찰하기 위해 상온(18°C), 30°C, 50°C, 70°C의 4가지 조건에 대한 실험을 수행한다.

Fig. 1은 정적인 상태에서 O-링의 축에 대한 접촉력, 즉 시일의 밀봉력을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 그림이다. 반원축에 O-링을 설치한 후 O-링



- ① 다이얼게이지
- ② 반원축
- ③ 히터
- ④ O-링
- ⑤ 레버
- ⑥ 하중계
- ⑦ 연결봉
- ⑧ 온도조절기
- ⑨ 인디케이터

Fig. 1. Schematic diagram of contact force tester.

의 초기 팽창조건과 온도 등의 영향을 1차적으로 보정하고, 밀봉력과 변형 거동량을 하중계와 변위계로 측정한다.

O-링에 공급되는 열량을 조절하고 실제의 접촉온도를 측정하기 위해 축의 원주방향으로 4개의 전기히터를 등간격으로 설치하고, 온도 컨트롤러에 의해 엄밀하게 제어된다. 온도에 관한 측정 데이터는 인디케이터에 의해 일정한 시간 간격으로 자동적으로 측정된다.

Fig. 2는 온도를 제어할 수 있는 O-링 실험장치를 보여주는 것으로 O-링의 접촉력과 변위량 등을 정밀하게 측정할 수 있는 개발된 다목적 O-링 실험장치이다.

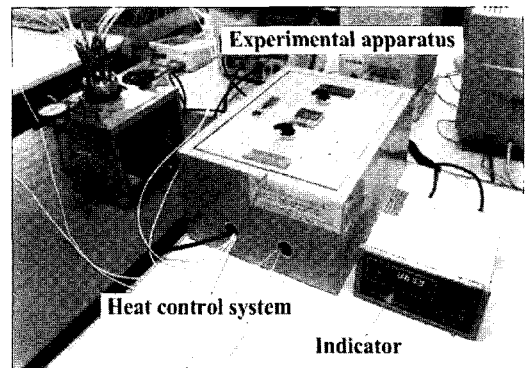


Fig. 2. Photographic view of experimental apparatus.

Table 1. Testing time and measuring interval for contact force of O-rings

Time, minute	Measure interval, minute
0 ~ 10	1
10 ~ 30	5
30 ~ 60	10
After 60	30

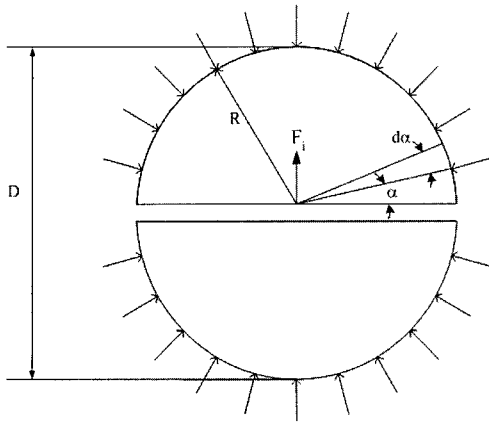


Fig. 3. Force equilibrium of splitted semi-circular cylinder.

본 논문에서 O-링의 접촉력을 이론적으로 계산하기 위해 두 개로 분할된 반원축에 설치된 O-링에서 발생하는 접촉력은 Fig. 3과 같이 반원축을 분리한 기하학적 형상 조건으로부터 계산될 수 있다. Fig. 3에서 힘 F 는 중심축 표면에 수직으로 작용하고, 이 힘은 실제의 실험장치에서 측정된 밀봉력 F 와 균형을 이루게 된다. 이러한 관계식을 요약하면, F 와 F_i 의 관계는 다음과 같이 된다.

$$F_i = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} F \cdot R \cdot \sin \alpha \, d\alpha = 2FR = FD \tag{1}$$

$$F = F_i/D \tag{2}$$

$$F_i = 2\pi RF = \pi FD = \pi F_i \tag{3}$$

여기서 F 는 단위 원주당의 힘, F_i 는 반경방향으로 가해지는 밀봉력, F 은 반경방향으로 작용하는 접촉력을 각각 나타낸다.

2-2. 유한요소 해석모델

O-링에 작용하는 밀봉력을 해석하기 위해 사용된 소재는 FFKM으로 내화학성과 내압축성, 고온성이 대단히 우수하다. 따라서 대단히 고가인 FFKM 제품은 대부분 특수한 사용조건에 국한되어 사용한다.

본 연구에서 사용한 FFKM 소재의 기계적 특성치를 파악하기 위해서 Fig. 4와 같이 KS M6518 가황고무 물리시험 방법에 따라 인장시편을 제작하여 동일한 조건하에서 여러 번의 인장시험을 실시하여 평균값을 취하였다. FFKM의 밀도는 1,850 kg/m³이고, 최고 인장

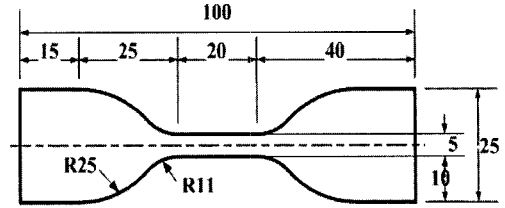


Fig. 4. Tensile specimen of dumbell No. 3.

강도는 16.528 MPa이다.

본 논문에서는 O-링의 접촉력에 대한 유한요소해석은 Fig. 4에서 제시한 인장시편을 사용한 응력-변형을 실험결과에 기초하여 수행하였다. 실험결과에 의하면 FFKM 소재의 비선형 거동특성을 관찰할 수 있었으며, 이것은 유한요소해석에서 소재의 비선형성을 고려해야 한다는 것으로, 비교적 안정적인 밀봉력변형 거동성을 정확하게 예측할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 O-링의 유한요소 해석 모델을 보여주고 있다. 시일이 설치되는 분할축과 아래판은 모두 강체로 가정하였고, 전기히터에 의해 가열되는 중심축에 18°C, 30°C, 50°C, 70°C의 온도가 안정적으로 유지된다고 고정하여 비선형 유한요소해석

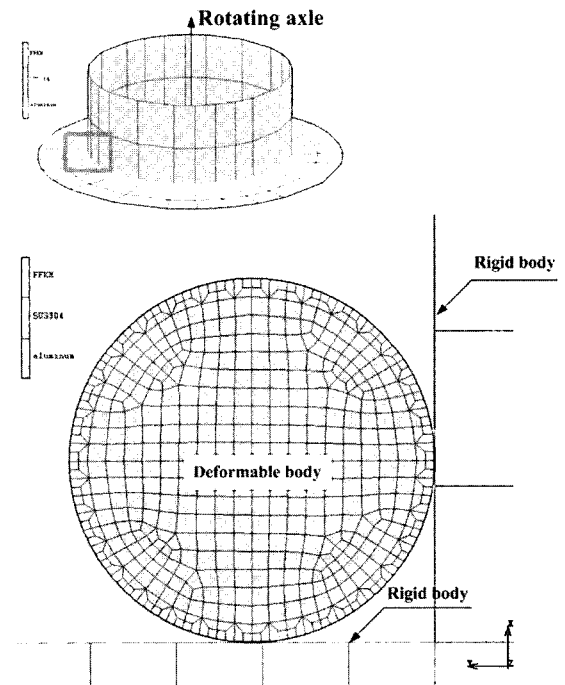
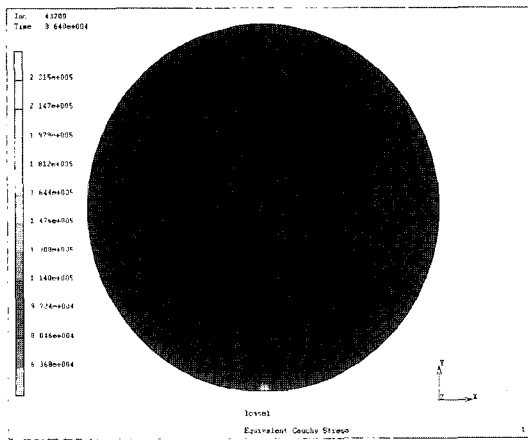


Fig. 5. Contact model of O-rings for a non-linear finite element analysis.

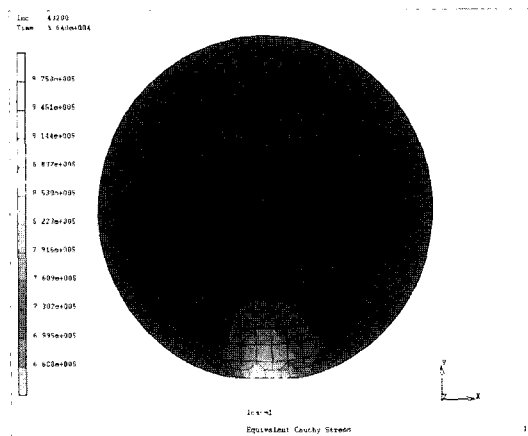
을 수행하였다. 이때 중심축으로부터 O-링으로 전달되는 전열량은 접촉 열전달계수를 고려하여 계산의 정확성을 기하였다. 중심축과 O-링 사이에는 전도와 대류에 의한 열전달이 실제로는 일어나지만, 실험조건을 설정하는 기준에 따라 대류에 의한 냉각효과는 무시할 수 있다. 본 연구에 사용된 O-링의 내경은 66.9 mm이고, 단면지름은 3.5 mm로, FFKM 소재를 사용하여 제조하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 6은 O-링이 설치된 중심축의 온도가 70°C로 높게 올라갔을 때, FFKM O-링의 밀봉 간섭량 변동에



(a) Interference of 0.4mm



(b) Interference of 3mm

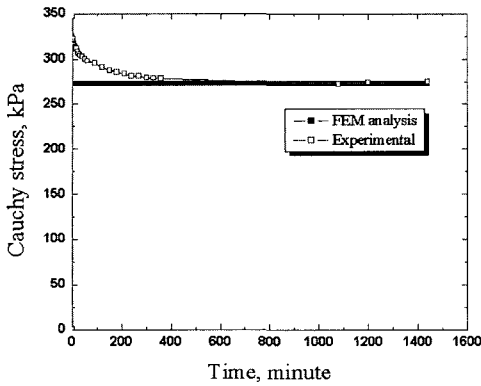
Fig. 6. Cauchy stress distributions of Perfluoroelastomer O-ring for a temperature of 70°C.

따른 Cauchy 응력 분포를 나타낸 대표적인 해석결과이다. Fig. 6(a)의 간섭량은 0.4 mm이고, Fig. 6(b)의 간섭량은 3 mm인 경우에 대한 해석으로 응력이 집중되는 패턴은 유사하지만, 그 크기에서는 약간의 차이가 발생한다. 즉, O-링의 간섭량이 0.4 mm인 경우 접촉면에서 발생한 응력은 0.232 MPa이고, 간섭량이 1 mm인 경우는 0.405 MPa, 간섭량이 2 mm인 경우는 0.685 MPa이며, 간섭량이 3 mm로 증가한 경우는 0.975 MPa로 비교적 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 밀봉 접촉면에서 발생한 응력은 실제로 접촉하는 간섭량이 증가함에 따라서 탄성변형 범위이내에서는 선형적으로 증가하고 있음을 제시한 데이터이다.

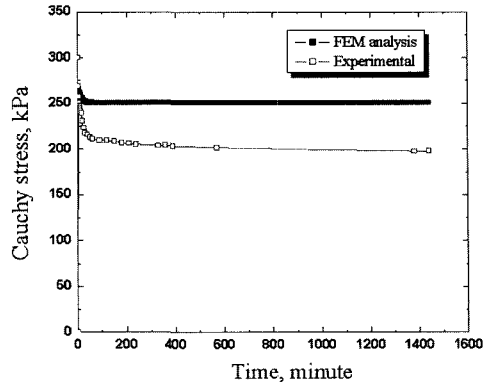
Fig. 7(a)~(d)는 FFKM O-링의 접촉 간섭량이 0.4 mm일 때, 중심축에 공급된 열에 의해 평형상태에 도달하는 시간을 24시간 정도로 충분히 평형성을 유지하였을 때 FFKM 소재에서 발생한 Cauchy 응력을 실험적으로 측정하고, 또한 FEM으로 해석한 결과를 비교적으로 제시하고 있다.

Fig. 7(a)는 중심축의 온도를 상온, 즉 18°C로 유지한 상태에서 O-링의 Cauchy 응력을 제시한 결과이다. 실험적 결과에 의하면, 초기의 응력은 증가한 상태를 유지하지만, 약 7시간이 경과하면 FEM으로 해석한 결과처럼 270 kPa 정도를 수렴하고 있다. 결국, 상온에서 측정된 O-링의 기계적 특성에서 탄성변형 거동성이 아직은 우수하기 때문에 초창기의 밀봉성은 높게 유지하지만, 시간이 경과함에 따라서 O-링의 탄성 변형력이 약화되고 상대적으로 영구 소성력이 증가되어 Fig. 7(a)와 같은 실험결과를 얻을 수 있다. FEM 해석에서 응력거동은 온도에 의한 영향을 균일하게 받고, 특히 낮은 온도를 유지하기 때문에 시간에 따른 영향이 대단히 작은 것으로 나타났다.

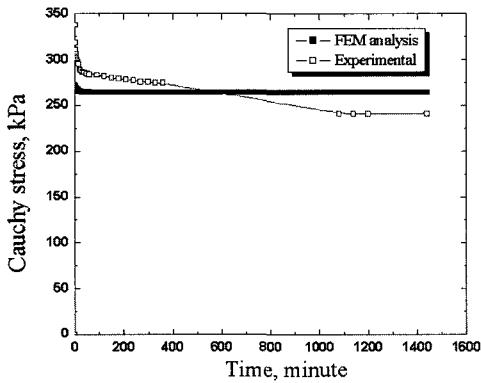
또한, 중심축의 온도가 30°C로 약간 증가한 Fig. 7(b)의 해석결과에 의하면, 실험을 시작한 후 13시간까지는 실험적으로 측정된 Cauchy 응력이 FEM 해석결과보다 높게 발생하였다. 그러나 약 13시간을 넘어서게 되면서 이론적 해석결과가 높게 유지되었고, 약 24시간이 경과되면 실험적 결과와 해석적 결과는 230 kPa 과 260 kPa로 각각 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이것은 O-링에 가해지는 온도조건이 30°C 정도일 경우는 O-링이 변형되어 유지되는 시간이 중요한 변수라는 사실이다. Fig. 7(b)의 Cauchy 응력분포를 보면, O-링에 공급되는 온도가 증가할수록 초기 접촉력에 의한 응력 거동 영향은 크게 줄어들고 있음을 알 수 있다.



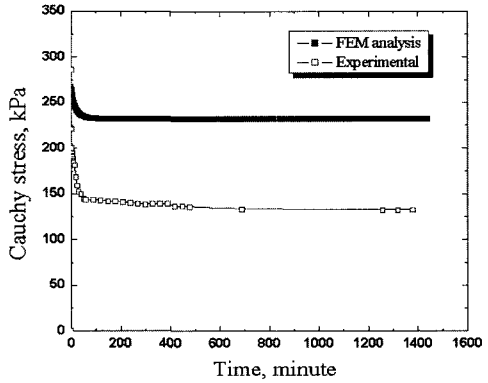
(a) Shaft temperature of 18°C



(c) Shaft temperature of 50°C



(b) Shaft temperature of 30°C



(d) Shaft temperature of 70°C

Fig. 7. Comparisons between measured and FEM calculated Cauchy stresses of Perfluoroelastomer O-rings as functions of shaft temperature.

중심축의 온도가 50°C로 상승한 Fig. 7(c)의 해석결과에 의하면, 실험적 결과는 초기의 응력이 높게 유지되지만, 온도에 의한 영향으로 Cauchy 응력은 200 kPa 정도로 빠르게 수렴하고, FEM 해석결과는 250 kPa로 수렴되고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 온도가 증가할수록 더 명확하게 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 여기서 두 가지 연구결과에서 실험적 결과는 O-링에 가해지는 온도가 접촉하는 표면에 의해 온도특성이 국부적으로 진행되고, 접촉면에 국부적으로 전도된 소재의 특성에 의해 응력거동 특성이 다르게 나타나고 있음을 예상할 수 있다. 이것에 비하여 FEM으로 해석한 Cauchy 응력은 FFKM 소재에 공급된 온도가 모든 부분에 대하여 균일하다고 가정하고 해석하였기 때문에 이러한 응력거동의 차이가 발생하는 것으로 예측된다. 이러한 경향은 O-링에 공급되는 온도가 증가할수록 비교적 안정적인 변화를 하기 때문에 가능한

예측이라 생각된다.

중심축의 온도가 증가할수록 실험적 응력결과와 해석적 연구결과의 차이는 더 크게 나타나고 있다. 중심축의 온도가 70°C로 높게 유지되는 Fig. 7(d)의 경우는 실험적 결과와 FEM 해석결과가 130 kPa과 230 kPa로서 각각 수렴되고, 이들의 응력 차이는 100 kPa로 Fig. 7(c)의 50°C 보다 두 배나 증가하였다. 즉, 중심축에서 전달된 열에 의해 축적된 접촉면이 국부적으로 제한되어 응력이 크게 국부적으로 낮아지지만, FEM에 의한 해석결과는 소재의 온도가 균일한 것처럼 이상적으로 유지되기 때문에 Cauchy 응력은 높게 계산된다는 사실이다.

Fig. 7(a)~(d)의 결과로부터 O-링에 전달되는 온도는 접촉하는 작은 면적에 균일하게 전도되어 분포하는지, 아니면 국부적으로 열이 축적되어 응력거동이 국부적으로 나타나는지가 실험적 측정결과와 FEM 해석결과

와의 차이점이라 생각된다. 이들의 차이를 줄여주기 위해서는 FEM 해석에서 소재의 온도분포가 균일하게 않고, 불균일하게 분포할 것이라는 데이터를 활용하면 O-링의 변형거동이 마이크로하게 진행되므로 거의 같은 데이터를 얻을 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 논문에서는 고온성과 내화학적 특성을 확보한 FFKM O-링에 대한 밀봉력을 측정하고, 이것을 바탕으로 비선형 유한요소법으로 해석한 결과를 제시하고 있다.

FEM 해석의 정확도를 높이기 위해 FFKM 소재의 응력-변형률 특성곡선을 실험적으로 측정하여 FEM 계산에 사용하였다. 이러한 특성곡선은 상온조건에서 획득한 결과이기 때문에 상온에서 수행한 실험적 결과와 유한요소해석 결과는 비교적 잘 일치하는 결과를 보여 주고 있다. 그러나 O-링의 접촉면에 전달된 국부적 온도가 증가할수록 실험적 결과와는 차이가 점차로 증가하였다. 이것은 O-링에 전도되는 열이 국부적으로 축적되고, FEM 해석에 사용한 온도조건은 상온에 대한 데이터로 실제조건과 FEM 해석조건에는 차이가 현실적으로 존재하기 때문에 이들의 차이는 피할 수 없다.

참고 문헌

1. Bernhard Richter, "Perfluoroelastomer O-rings Reduce Risk of Failure," *World Pumps*, pp. 34-36, July 1995.
2. Peter Waschle and Heiz K. Muller, "PTFE-Shaft Seal for Higher Pressures," *Institute for Machine Element*, University Stuttgart, Germany.
3. P. Botto, E. Dragoni and A. Strozzi, "Finite Element Redesign of Reciprocating 'PTFE' Rod Seal," pp. 671-683.
4. Green, I. and English, C., "Stress and Deformation of Compressed Elastomeric O-ring Seals," *International Conference on Fluid Sealing*, Firenze, Italy, pp. 83-95, 1994.
5. Kim, C.K., Cho, S.H. and Ko, Y.B., "Computer Simulations on the Thermomechanical Distortions of an O-ring Seal Including a Temperature," *Proceedings of the International Tribology Conference*, Nakasaki, Japan, pp. 1925-1929, 2000.
6. Chung Kyun Kim and Seung Hyun Cho, "A Numerical Study on the Contact Behavior Analysis of Double Layer O-rings," *J. of the KSTLE*, Vol. 19, No. 1, Feb., pp. 9-14, 2003.
7. "MARC user's manual," Ver. K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.